

## WPLYW KONSTRUKCJI UKŁADU DOLOTOWEGO NA ROZKŁAD POWIETRZA W KOLEKTORZE DOLOTOWYM

*W artykule omówiona została budowa układu dolotowego oraz podstawowa problematyka z nim związana. W przeprowadzonych badaniach przy użyciu technik komputerowych przeprowadzono szereg symulacji cykli jezdnych w których określono najczęściej wykorzystywany zakres obrotów podczas realizacji wybranych profili prędkości dla różnych stylów jazdy oraz rodzajów układu napędowego. Do analizy rozkładu powietrza w kolektorze dolotowym wykorzystano metodę cyfrowej anemometrii obrazowej wykorzystującą metodę noża optycznego i szybkiej kamery wideo. Wykazano różnice w przepływie powietrza przez przepustnicę przy przykładowych kątach jej otwarcia oraz jego rozkład w zależności od ukształtowania układu dolotowego przed przepustnicą.*

### WSTĘP

Przepływ powietrza w układzie dolotowym ściśle determinuje wartość współczynnika napełnienia cylindrów oraz wpływa na moc maksymalną silnika, która jest jednym z głównych parametrów samochodu podawanych przez producentów. Konstruktorzy dążąc do poprawienia wskaźników pracy silnika starają się zwiększyć ilość dostarczanego do niego powietrza stosując różnorakie rozwiązania, jednak wszystkie opierają się na podstawowych założeniach, którymi są:

- zmniejszenie oporów przepływu,
- podwyższenie ciśnienia w kolektorze dolotowym,
- dostarczanie powietrza o możliwie najniższej temperaturze.

W celu ich realizacji obok odpowiedniej konstrukcji układu dolotowego silnik wyposaża się w urządzenia sprężające, a dolot do nich buduje się w taki sposób, aby źródło poboru świeżego powietrza było umiejscowione możliwie daleko od źródeł ciepła. W przypadku silników doładowanych stosuje się specjalne chłodnice, które chłodzą powietrze ogrzane wcześniej w skutek sprężenia. Ochłodzone powietrze zwiększa swoją gęstość co powoduje, że w tej samej objętości skokowej mieści się większa ilość cząstek tlenu.

W sytuacjach, w których nie ma potrzeby korzystania z maksymalnych osiągnięć silnika, przy pomocy przepustnicy ograniczającej swobodę przepływu powietrza zmniejsza się stopień napełnienia cylindrów. W starszych układach przepustnica powietrza była bezpośrednio połączona z pedałem przyspieszenia za pomocą cięgna i to kierowca w pełni sterował jej położeniem. Nowoczesne układy wyposażone są w sterowanie elektroniczne w którym sterownik ECU silnika przetwarza sygnały z elektronicznego pedału przyspieszenia oraz innych czujników określających chwilowe parametry pracy i oblicza odpowiednie wartości kąta otwarcia. Elektroniczny sygnał wysyłany jest do przepustnicy i realizowany przez jej silnik.

Układy zasilania powszechnie spotykane w samochodach osobowych w swej pierwszej części składają się z jednego przewodu na którym za filtrem powietrza zamontowany jest przepływomierz bądź czujnik ciśnienia, a rozdział powietrza na poszczególne cylindry następuje dopiero za przepustnicą, w kolektorze dolotowym. Rozwiązanie takie może powodować nierównomierności w zaopatrzeniu cylindrów w świeże powietrze potrzebne do stworzenia

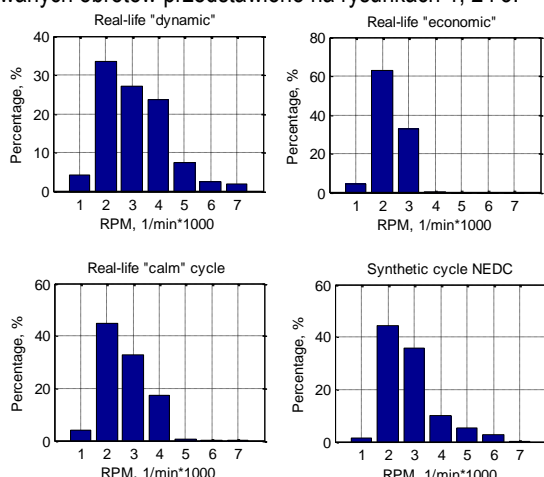
mieszanki palnej. W silniku wyposażonym w mieszalnik znajdujący się przed przepustnicą bądź wtrysk jednopunktowy niepoprawny rozkład ładunku skutkuje jedynie nierównomierną pracą silnika na poszczególnych cylindrach. Układy wyposażone w wielopunktowy, pośredni lub bezpośredni układ wtryskowy są bardziej wrażliwe na różnice ilości powietrza pomiędzy cylindrami. Większość układów wprowadza korekty dawki paliwa wykorzystujące sygnał z czujnika tlenu w spalinach, który podaje wartość uśrednioną dla każdego z cylindrów. Często jest, że w takim rozwiązaniu mimo poprawnej średniej wartości współczynnika nadmiaru powietrza część cylindrów pracuje przy dawkach ubogich a reszta przy bogatych, co skutkuje podwyższoną emisją szkodliwych substancji do środowiska. Efekt ten można zmniejszyć stosując dla każdego cylindra indywidualny czujnik tlenu w spalinach, bądź też czujnik kontrolujący ilość dostarczanego do każdego cylindra powietrza i dawkując paliwo indywidualnie według zapotrzebowania. Kolejną możliwością jest takie budowanie układów dolotowych aby zapewniały możliwie równy rozkład powietrza pomiędzy wszystkimi cylindrami. To rozwiązanie było przedmiotem badań przeprowadzonych na potrzeby niniejszego artykułu.

### 1. ZAKRES BADAŃ

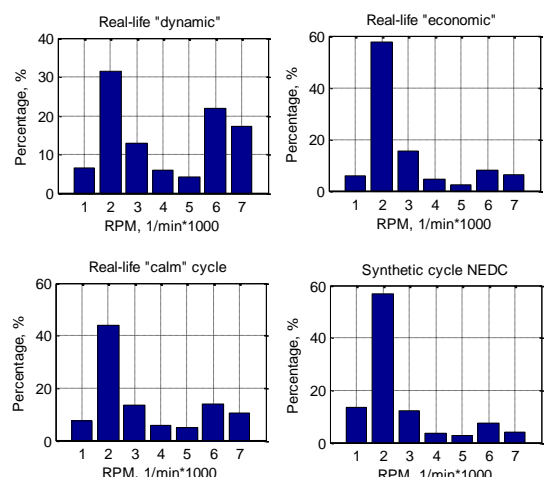
Jak wspomniano na początku pracy, producenci samochodów osobowych jako główne parametry silnika podają jego maksymalną moc oraz moment obrotowy które dla silników z zapłonem iskrowym najczęściej są uzyskiwane przy 5500obr/min dla mocy i 3500obr/min dla momentu. Podejście takie nie jest poprawne, ponieważ podczas codziennej eksploatacji pojazdu tak wysoki zakres obrotów nie jest wykorzystywany. Aby udowodnić wysunięte założenie przeprowadzono szereg symulacji numerycznych. W Katedrze Pojazdów Politechniki Opolskiej opracowano Symulator Drogowego Obciążenia Silnika, wykorzystujący wirtualny silnik zapisany w postaci numerycznej w pamięci komputera, za pomocą którego istnieje możliwość przeprowadzenia symulacji cykli jezdnych. Taka symulacja pozwala w sposób mało inwazyjny rozpoznać punkty pracy układu napędowego na tle charakterystyki silnika spalinowego.

Przeprowadzono serię pomiarów zakresu pracy silnika podczas realizacji rzeczywistych i syntetycznych profili prędkości dla różnej dynamiki jazdy oraz przy wykorzystaniu trzech rodzajów skrzyni

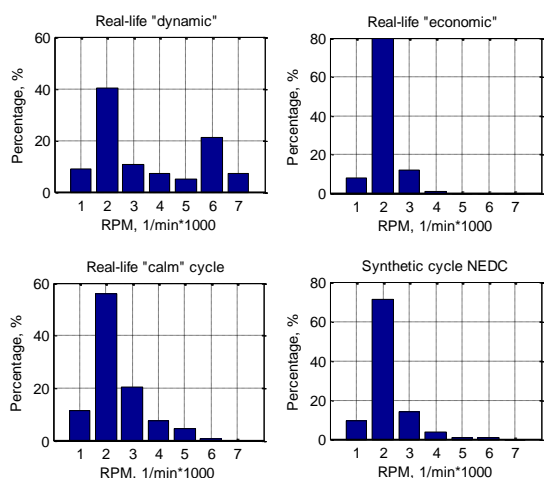
biegów: manualnej stopniowej, automatycznej stopniowej oraz automatycznej bezstopniowej. Udział procentowy zakresu wykorzystywanych obrotów przedstawiono na rysunkach 1, 2 i 3.



**Rys. 1.** Najczęściej używane zakresy prędkości obrotowej podczas realizacji cykli jezdnych przy manualnej skrzyni biegów



**Rys. 2.** Najczęściej używane zakresy prędkości obrotowej podczas realizacji cykli jezdnych przy automatycznej, stopniowej skrzyni biegów



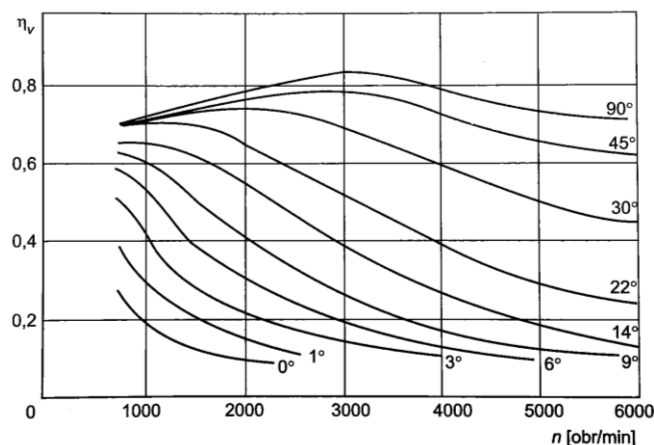
**Rys. 3.** Najczęściej używane zakresy prędkości obrotowej podczas realizacji cykli jezdnych przy automatycznej, bezstopniowej skrzyni biegów

Oporając się na powyższych wynikach badań symulacyjnych zauważyć można bardzo wyraźną dominację czasu pracy silnika na poziomach oscylujących wokół prędkości obrotowej 2000obr/min.

Tendencja ta utrzymuje się niezależnie od rodzaju układu napędowego oraz stylu jazdy.

W ramach badań przeprowadzonych na potrzeby niniejszego artykułu postanowiono porównać przepływ powietrza w kolektorze ssącym silnika 9A koncernu Volkswagen przy parametrach pracy dla: najczęściej używanego zakresu obrotów, punktu maksymalnego momentu obrotowego oraz punktu maksymalnej mocy silnika.

Niezbędne do przeprowadzenia wybranych badań wizualizacyjnych było określenie rzeczywistych parametrów przepływu. Korzystając z zależności przedstawionych na rysunku 4 dla każdej wybranej prędkości obrotowej określono indywidualnie współczynnik napełnienia cylindra.



**Rys. 4.** Charakterystyka współczynnika napełnienia w zależności od kąta uchYLENIA przepustnicy i prędkości obrotowej[6]

Następnie określono masowy strumień powietrza, który należy dostarczyć do układu w celu zapewnienia warunków przepływu panujących podczas pracy silnika.

$$V = V_s \cdot n \cdot 60 \cdot 2 \quad (1)$$

gdzie:

$V$  – objętościowy strumień powietrza,

$V_s$  – objętość skokowa silnika,

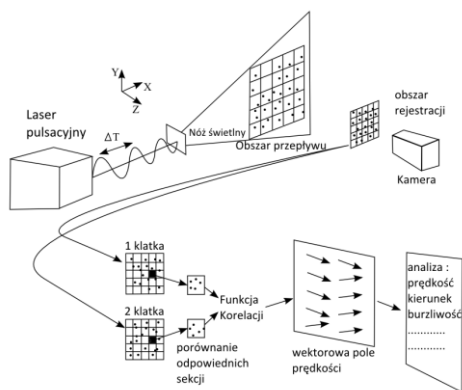
$n$  – prędkość obrotowa silnika.

**Tab. 1.** Strumień objętościowy powietrza przepływającego przez układ dolotowych w wybranych punktach pracy

	2000obr/min	3500obr/min	5500obr/min
50%	73 m <sup>3</sup> /h	131 m <sup>3</sup> /h	172 m <sup>3</sup> /h
100%	77 m <sup>3</sup> /h	137 m <sup>3</sup> /h	198 m <sup>3</sup> /h

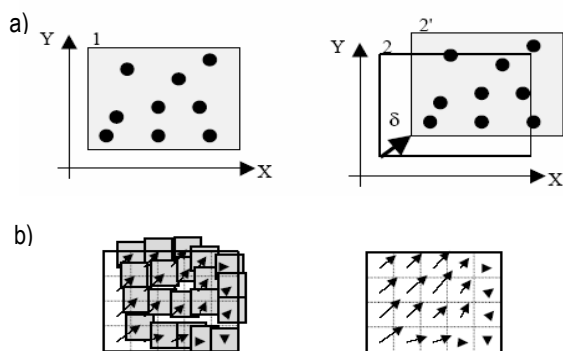
## 2. METODYKA BADAŃ

Przegląd literaturowy w dziedzinie badań kolektorów dolotowych pokazuje, że większość z nich opiera się na symulacjach komputerowych [1, 2]. Nowoczesne technologie pozwalają na precyzyjne rejestrowanie obrazów przedstawiających elementy maszyn, urządzeń i procesów w postaci graficznych obrazów. Wykorzystując metodę cyfrowej anemometrii obrazowej (DPIV - Digital Particle Image Velocimetry) polega na rejestracji zjawisk przepływowych z wykorzystaniem techniki noża optycznego (rys. 5). Źródłem światła do jego wytworzenia są różnego rodzaju lasery, zarówno o działaniu ciągłym, jak i impulsowym. Obraz rejestrowany przez kamerę wideo umieszczoną prostopadle do płaszczyzny światła, dzięki specjalistycznym filtrom rejestrowany jest jedynie w płaszczyźnie rejestrowanej przez wiązkę lasera.



**Rys. 5.** Schemat pomiarowy metody cyfrowej anemometrii obrazowej [9]

Czynnik przepływający przez badany aparat zmieszany jest z inertnym znacznikiem dzięki któremu kamera wideo rejestruje pole przemieszczających się wraz z płynem punktów (pikseli). Uzyskane obrazy, rejestrowane w znanym i precyzyjnie odmierzonej odległości czasowej, poddawane są analizie pod względem zmian rozkładu koncentracji cząstek znacznikowych zawieszonych w przemieszczającym się gazie. W efekcie rozmieszczenie pikseli z pierwszego obrazu jest poszukiwane na kolejnym obrazie (rys 6). Do wyznaczenia średniego przesunięcia znaczników wykorzystuje się metodę korelacji krzyżowej CCF (Cross Correlation Function)[3].



**Rys. 6.** Podział zarejestrowanej pary obrazów na sekcje – obszary badawcze i wyznaczenie wektora przemieszczenia dla poszczególnych sekcji. 1 – sekcja obrazu 1, 2 – sekcja obrazu 2, 2' – sekcja obrazu 1 odnaleziona na obrazie 2,  $\delta$  - przemieszczenie sekcji 2' względem sekcji obrazu 1, zamiana przemieszczeń na wektorowe pole prędkości [8]

Aby zmniejszyć wpływ czynników zewnętrznych na dokładność pomiaru zalecane jest poddanie serii zarejestrowanych obrazów wcześniejszej obróbce graficznej. Jeżeli dalszej analizie poddawany jest jedynie fragment zarejestrowanego obrazu, zaleca się naniesienie maski na obszary które mają zostać wykluczone z toku obliczeń. Aby uzyskać obraz który przedstawiać będzie wyłącznie cząstki opisujące ruch płynu, serię danych poddaje się analizie uśrednienia geometrycznego wyszukującego rozkładu koncentracji pikseli o niezmiennym położeniu. Wygenerowany w ten sposób obraz tła jest odejmowany od wszystkich zarejestrowanych surowych obrazów serii pomiarowej. Tak przygotowane dane poddawane są metodzie korelacji krzyżowej, a następnie uśrednieniu otrzymanych wyników. Uzyskane pole wektorowe będzie przedstawiało kierunki oraz prędkości przemieszczających się cząstek badanego płynu.

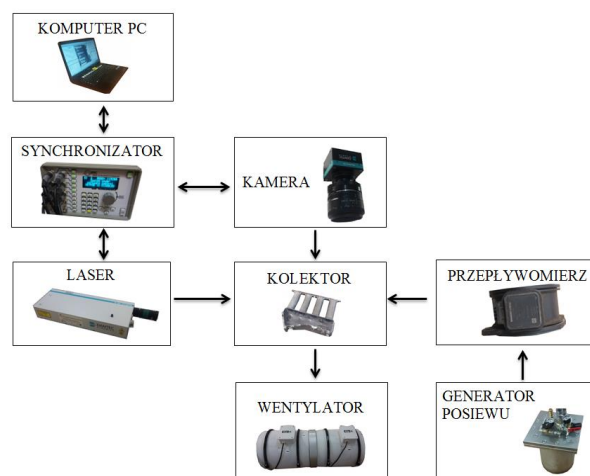
### 3. STANOWISKO DO BADAŃ PRZEPŁYWU POWIETRZA W KOLEKTORZE DOLOTOWYM

Warunkiem stawianym przez metodę cyfrowej anemometrii obrazowej jest to, aby badany przedmiot był skonstruowany tak aby umożliwiał wizualną obserwację zachodzących w środku zjawisk. W tym celu zmodernizowano badany kolektor w taki sposób, aby niezmienną została oryginalna geometria przepływu, a spełnione zostały warunki stawiane przez metodę. W celu wykorzystania techniki noża światłowego do wizualizacji przepływu za pomocą kamery wideo usunięto dwie ściany boczne oraz ścianę czołową kolektora. Dla zapewnienia szczelności układu, miejsca pozbawione rodzimego materiału zastąpiono przezroczystym tworzywem sztucznym.



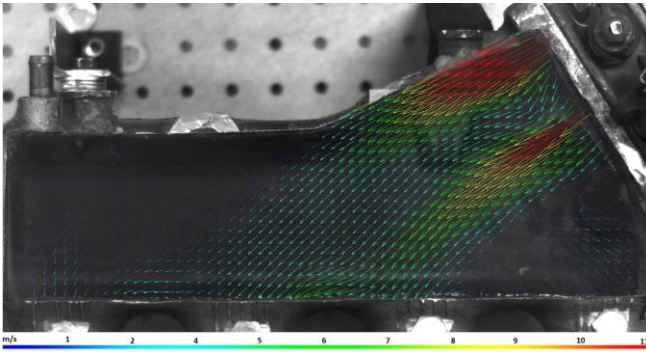
**Rys. 7.** Kolektor dołotowy wraz z badanym kolanem

Noż światłowy przecinający kolektor, generowany jest przez laser pulsacyjny o mocy 1200mJ wyposażony w specjalistyczny układ optyczny. Kamerę wideo, rejestrującą obrazy w technice double frame umieszczono nad badanym kolektorem prostopadle do płaszczyzny noża, natomiast ruch powietrza wewnątrz kolektora zgodny z kierunkiem pracy silnika spalinowego wymuszono wysysając powietrze za pomocą wentylatora z regulacją obrotów. Przed wlotem do przepustnicy układ wyposażono w masowy przepływomierz powietrza kontrolujący ilość przepływającego czynnika oraz w generator posiewu wytwarzający cząstki znacznikowe o średnicy 2÷5  $\mu\text{m}$ . Jako znacznika użyto sebacynianu bis (2-etyloheksylu), a jego koncentrację dobrano eksperymentalnie, wykonując serię pomiarów próbnych.

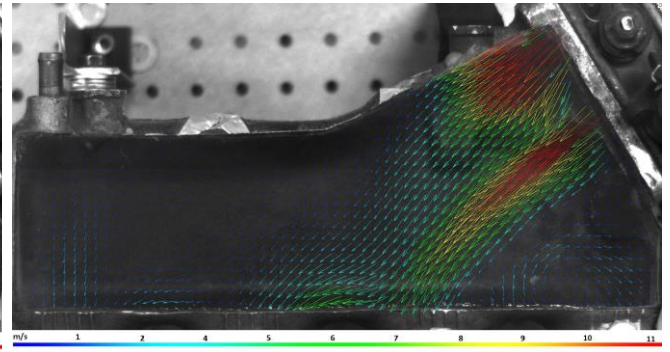


**Rys. 8.** Schemat stanowiska pomiarowego

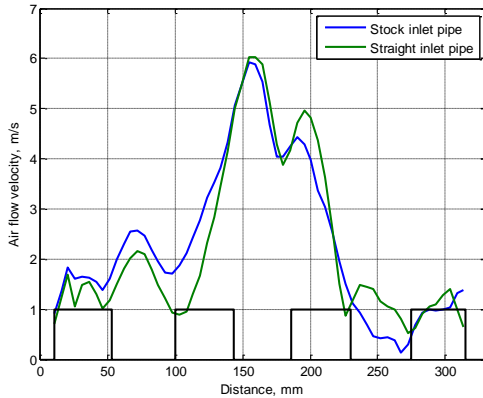
Wyniki badań w postaci pól wektorowych naniesionych na obraz przedstawiający kształt badanego kolektora przedstawiono na rysunkach 9÷14.



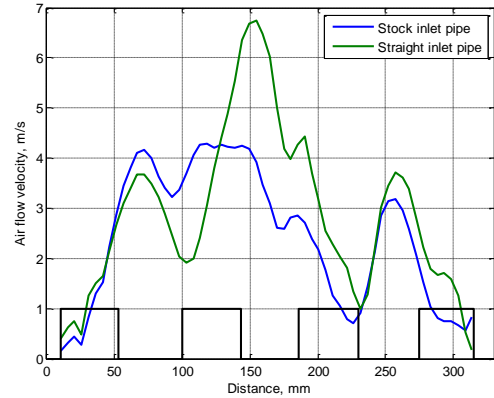
**Rys. 9.a.** Pola prędkości dla 2000obr/min i 50% otwarcia przepustnicy, dla oryginalnego układu dolotowego



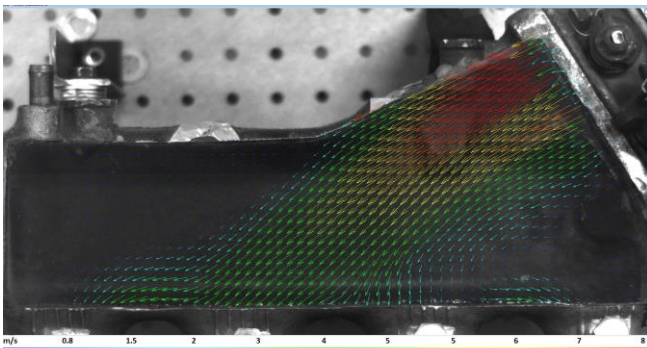
**Rys. 9.b.** Pola prędkości dla 2000obr/min i 50% otwarcia przepustnicy, dla prostego układu dolotowego



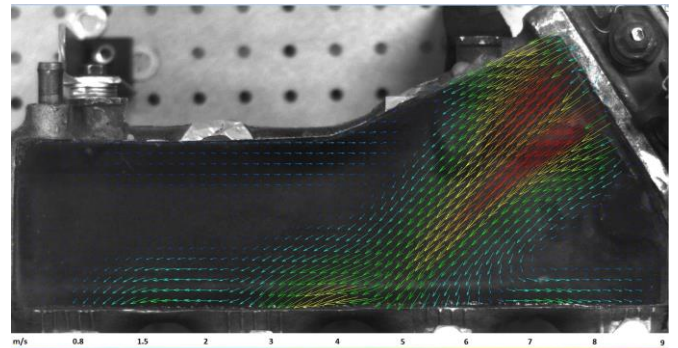
**Rys. 9.c.** Profil prędkości przy wylocie z kolektora dla 2000obr/min i 50% otwarcia przepustnicy.



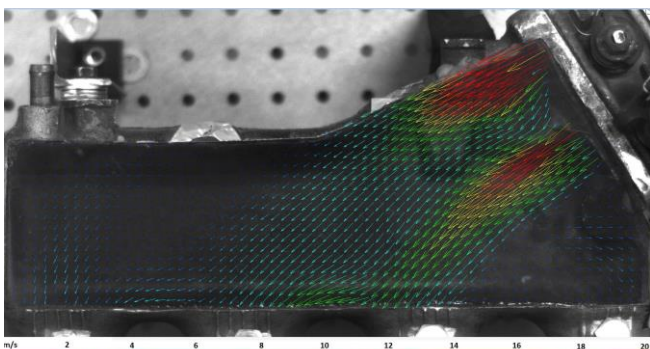
**Rys. 10.c.** Profil prędkości przy wylocie z kolektora dla 2000obr/min i 100% otwarcia przepustnicy.



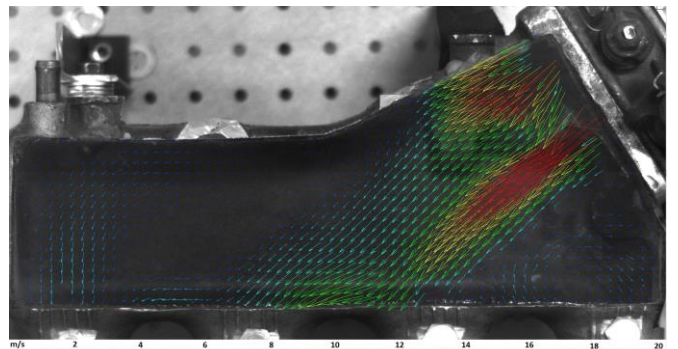
**Rys. 10.a.** Pola prędkości dla 2000obr/min i 100% otwarcia przepustnicy, dla oryginalnego układu dolotowego



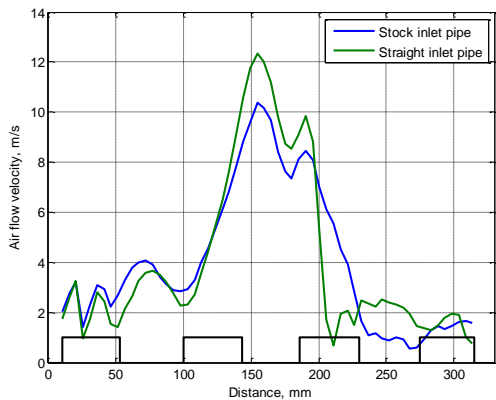
**Rys. 10.b.** Pola prędkości dla 2000obr/min i 100% otwarcia przepustnicy, prostego układu dolotowego



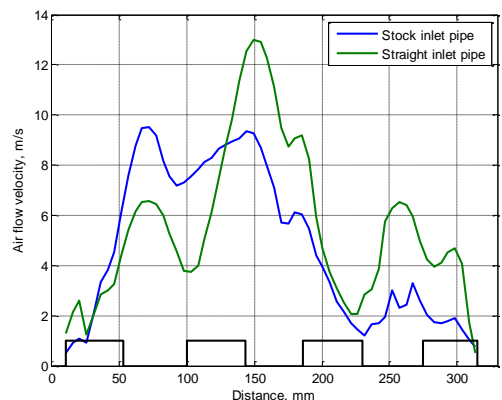
**Rys. 11.a.** Pola prędkości dla 3500obr/min i 50% otwarcia przepustnicy, dla oryginalnego układu dolotowego



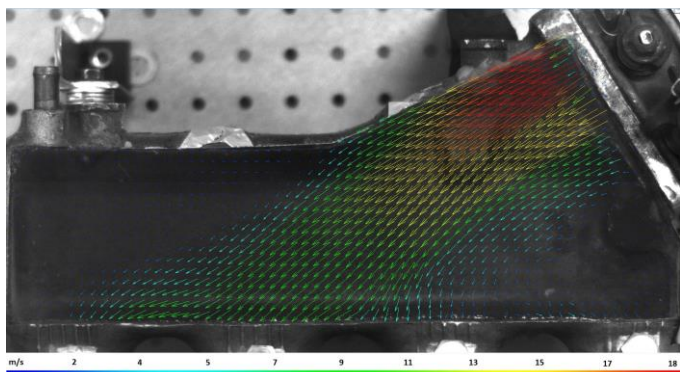
**Rys. 11.b.** Pola prędkości dla 3500obr/min i 50% otwarcia przepustnicy, dla prostego układu dolotowego



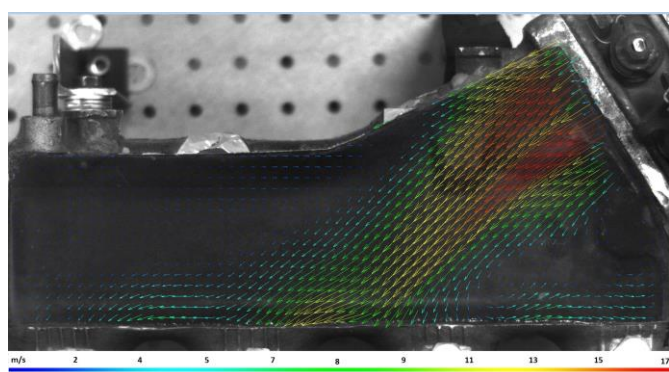
**Rys. 11.c.** Profil prędkości przy wylocie z kolektora dla 3500obr/min i 50% otwarcia przepustnicy



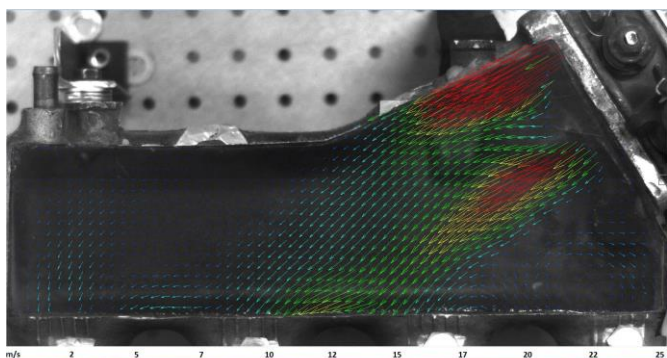
**Rys. 12.c.** Profil prędkości przy wylocie z kolektora dla 3500obr/min i 100% otwarcia przepustnicy



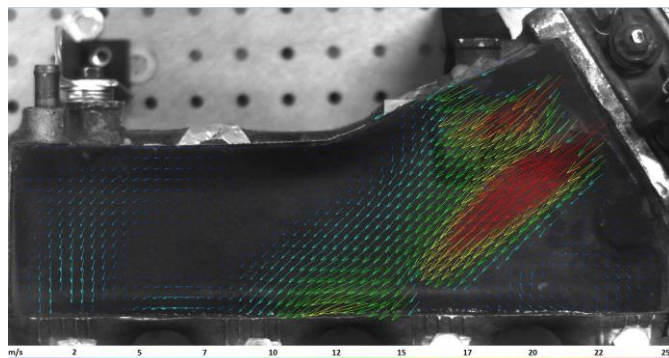
**Rys. 12.a.** Pola prędkości dla 3500obr/min i 100% otwarcia przepustnicy, dla oryginalnego układu dolotowego



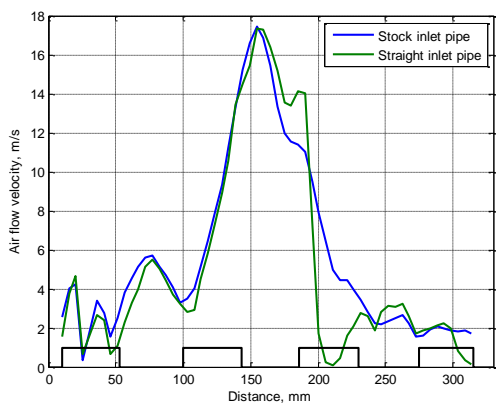
**Rys. 12.b.** Pola prędkości dla 3500obr/min i 100% otwarcia przepustnicy, dla prostego układu dolotowego



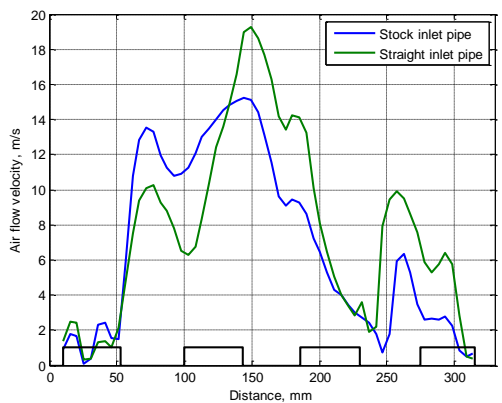
**Rys. 13.a.** Pola prędkości dla 5500obr/min i 50% otwarcia przepustnicy, dla oryginalnego układu dolotowego



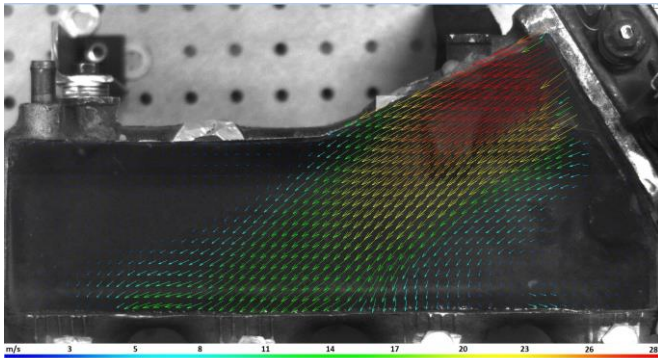
**Rys. 13.b.** Pola prędkości dla 5500obr/min i 50% otwarcia przepustnicy, prostego układu dolotowego



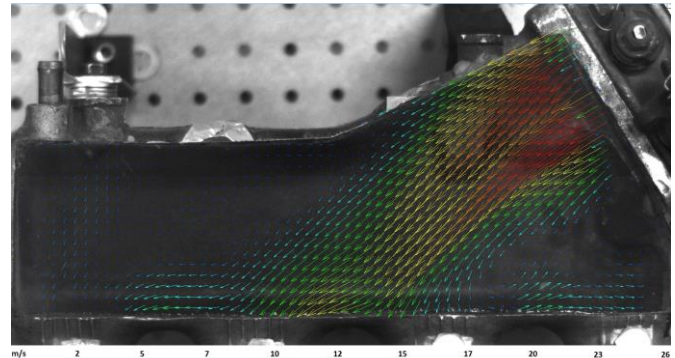
**Rys. 13.c.** Profil prędkości przy wylocie z kolektora dla 5500obr/min i 50% otwarcia przepustnicy



**Rys. 14.c.** Profil prędkości przy wylocie z kolektora dla 5500obr/min i 100% otwarcia przepustnicy



**Rys. 14.a.** Pola prędkości dla 5500obr/min i 100% otwarcia przepustnicy, dla oryginalnego układu dolotowego



**Rys. 14.b.** Pola prędkości dla 5500obr/min i 100% otwarcia przepustnicy, dla prostego układu dolotowego

**Tab. 2.** Średnia wartość prędkości w badanym obszarze

		Oryginalny wlot	Prosty wlot
50%	2000 obr/min	2,914 m/s	2,551 m/s
	3500 obr/min	4,935 m/s	4,58 m/s
	5500 obr/min	6,848 m/s	6,017 m/s
100%	2000 obr/min	2,724 m/s	2,536 m/s
	3500 obr/min	5,828 m/s	5,195 m/s
	5500 obr/min	8,936 m/s	8,336 m/s

Przeprowadzając wstępną, wizualną analizę porównawczą wyników przedstawionych na rysunkach 9÷14, zauważamy wyraźne różnice w zagęszczeniach pól prędkości o znacznie większej wartości niż pozostałe obszary. Rzeczywiste prędkości przy wylotach z kolektora przy uchyleniu przepustnicy o 50% są bardzo podobne dla różnych kształtów wlotu, a miejscami niemalże identyczne. Mogłoby się wydawać, że prosty wlot spowoduje wzrost prędkości w całym obszarze badawczym, lecz dane liczbowe zawarte w tabeli 2 pokazują bezsprzecznie odwrotne wartości. Niezależnie od uchylenia przepustnicy i prędkości obrotowej układ dolotowy wyposażony w oryginalne kolano powoduje większe średnie prędkości przepływu w badanym obszarze kolektora.

## PODSUMOWANIE

Przedstawiona analiza danych symulacyjnych wykazała, że prędkości obrotowe przy których osiągany jest maksymalny moment obrotowy i moc silnika nie są często używanym zakresem pracy podczas realizacji rzeczywistych i syntetycznych cykli jezdnych. Przeprowadzone badania eksperymentalne pokazują znaczne różnice w rozdziale powietrza pomiędzy cylindrami dla każdego rodzaju badanej modyfikacji. Barwne wektory przedstawiające prędkość i kierunek przepływu w graficzny sposób obrazują miejsca w których powietrze porusza się najszybciej. Pomimo modyfikacji układu dolotowego profil prędkości w linii kanałów dolotowych nie zmieniał się w znaczący sposób dla 50% uchylenia przepustnicy, a przy pełnym jej otwarciu zauważano już znaczne odchyłki. Pomimo, iż prędkości na wylotach z kolektora dla badanej płaszczyzny w większości przypadków są większe dla prostego wlotu, to średnia prędkość w całym badanym obszarze jest większa dla układu z oryginalnym kolaniem. Wykonane badania przedstawiają również nierównomierność rozplywu powietrza. Jak wspomniano we wstępie pracy, zróżnicowane zaopatrzenie cylindrów w świeże powietrze może skutkować innymi wartościami współczynnika nadmiaru powietrza powodującymi podwyższoną emisję szkodliwych substancji do środowiska.

## BIBLIOGRAFIA

1. A. NIGRO , A. ALGIERI, , C.D. BARTOLO , S. BOVA, Fluid dynamic investigation of innovative intake strategies for multi-valve internal combustion engines. International Journal of Mechanical Sciences Volume 123, April 2017, Pages 297–310
2. J. MAMALA, The analysis of spark ignition engine short-time supercharging. Combustion engines, No. 4/2009 (139), (3-11)
3. J.S. BENDAT, A.G. PIERSOL, Random Data: Analysis and Measurement Procedures, 4th Edition, Wiley, Hoboken, 2010
4. K. CUPIAŁ, A. DUŻYŃSKI, J. GRZELKA, Wpływ pulsacji ciśnienia w układzie dolotowym na rozdział świeżego ładunku w silniku gazowym. KONES 2000. 26 Międzynarodowa Konferencja Naukowa Silników Spalinowych. Nałęczów 2000, (31-36)
5. K. ŚWIĘCICKI, Konstrukcja układu dolotowego silnika spalinowego. Modelowanie Inżynierskie, nr 57, ISSN 1896-771X
6. P. ZAJĄC, Silniki pojazdów samochodowych. Podstawy budowy, diagnozowania i naprawy. WKŁ 2015.
7. R.J. ADRIAN, J. WESTERWELL, Particle image velocimetry, Cambridge University Press, Cambridge 2011
8. W.SUCHECKI, S. ALABRUDZIŃSKI, Metoda korekty wykresów pól prędkości w cyfrowej anemometrii obrazowej, Inżynieria i aparatura chemiczna, 42 (34) nr 3 s. 14-20, 2003
9. <https://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-piv>, z dnia 25.02.2017r.

### The effect of engine intake system design on air distribution in intake manifold

*The article describes the construction of engine intake system and basic problems associated with it. The presented research was conducted with the use of computer techniques-simulations of drive cycles were carried out to determine the most commonly used engine speed range for different driving styles and drivetrain types. PIV technique was used to analyze air distribution in the intake manifold. Differences in air flow through the throttle for different throttle angles were shown along the effect of manifold shape on said differences.*

Autorzy:

mgr inż. **Szymon Kołodziej** - Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, s.kolodziej@po.opole.pl

mgr inż. **Krzysztof Hennek** – Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, k.hennek@po.opole.pl